

В.Е. Кажан, В.В. Степкин, К.А. Котлярова, А.В. Юдин

## **АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОЛУМАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Аннотация.* В статье разработана аналитическая полумарковская модель оценки качества система технического обслуживания (СТО) и состояния электромеханических комплексов (ЭМК). В работе рассматривается методика выбора оптимальных периодичностей проведения и алгоритм формирования оптимальных стратегий технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР). Такая модель, построенная на базе полумарковских процессов, позволяет получить необходимые технико-экономические показатели качества и построить адаптивную СТО ЭМК.

*Ключевые слова:* технико-экономические показатели, полумарковский процесс система технического обслуживания, электромеханический комплекс, граф состояний и переходов, модель, показатели надежности, стратегия обслуживания.

**Постановка проблемы.** Необходимость оценки надежности непосредственно связана с повышением эффективности и качества, уменьшением материальных и временных затрат на эксплуатацию металлургических ЭМК, в том числе электроприводов, а также совершенствованием их СТО. Поэтому оценка показателей технической надежности является важной и актуальной задачей, решаемой на всех этапах “жизненного” цикла ЭМК. Для современных ЭМК, представляющих собой многообъектовые и функционально связанные технологические комплексы и установки, важно знать, за какое время и до какого уровня СТО сможет восстановить утраченную в результате отказа или ТО готовность комплексов. Кроме того, нельзя не учитывать эксплуатационные затраты и технико-экономическую важность ЭМК, что непосредственно влияет на уровень энергосбережения. В работе рассматривается методика и алгоритм определения оптимальных периодичностей и стратегий ТО ком-

плексов. Для решения задачи предлагается полумарковская модель эксплуатации ЭМК.

**Анализ основных исследований.** При большой периодичности проведения ТО в ЭМК накапливаются скрытые отказы, приводящие к увеличению времени простоя системы. При уменьшении периодичности ТО увеличивается частота нахождения ЭМК в режиме ТО, что, в свою очередь, ведет к снижению её уровня готовности и увеличению затрат. Анализ СТО ЭМК указывает на то, что ТО проводятся с неизменными во времени объемами и периодичностями, принимая за величину параметра потока (интенсивность) отказов его среднее значение на интервале эксплуатации. Однако, на практике показатели надежности ЭМК, в частности интенсивность отказов, являются изменяющимися во времени величинами. В силу этого имеет смысл определять такие значения периодичностей ТО, которые обеспечивали бы на протяжении всего "жизненного" цикла ЭМК максимальный коэффициент готовности.

Для поддержания высокого уровня готовности ЭМК в процессе эксплуатации проводятся различные виды ТО, регламентированные по объемам, периодичностями и длительностями их проведения. Опыт эксплуатации указывает на необходимость уточнения объемов и порядка проведения некоторых видов ТО. Всё это приводит к необходимости рассмотрения различных вариантов ТО ЭМК, что позволит определить действительно целесообразные объемы, периодичности и порядок их проведения в каждом из состояний системы. Выбор того или иного мероприятия, как и отдельных его составляющих операций, зависит от технико-экономической и производственной целесообразности.

**Цель статьи (постановка задачи).** Построение и исследование математической модели процесса эксплуатации ЭМК для определения оптимальных периодичностей и стратегий технического обслуживания и текущего ремонта.

**Основная часть исследования (построение модели).** Задача определения оптимальных периодичностей ТО ЭМК сформулирована следующим образом. Известны закон изменения интенсивности, вероятности обнаружения отказов и появления отказов, продолжительности

различных видов ТО, текущего ремонта, а также другие характеристики СТО. Определить для любого шага эксплуатации длительностью такие значения периодичностей ТО, которые обеспечивают максимальную величину коэффициента готовности ЭМК. Решение такой задачи состоит из следующих основных этапов: построение модели процесса эксплуатации ЭМК; вывод расчетного соотношения для коэффициента готовности как функции параметров технического состояния ЭМК и СТО; получение аналитического выражения для определения оптимальных периодичностей  $q$ -го вида ТО.

Решение первого этапа задачи основывается на использовании полумарковской модели процесса эксплуатации ЭМК, заданного на множестве дискретных состояний и возможных переходов на интервале эксплуатации [2,3] и представленного в виде ориентированного графа состояний и переходов (ГСП) ЭМК. На основании этой модели получена система уравнений [1,4], решением которой является математическое выражение для определения значения оптимальной периодичности  $T_p^*$  ТО ЭМК

$$T_p^* = -\frac{1}{\Lambda_y} \ln \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\beta}{2} + \sqrt{\left(\frac{\beta}{2}\right)^3 + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2}} - \sqrt[3]{\frac{\beta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\beta}{2}\right)^3 + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2}} \right),$$

связывающее продолжительность ТО с параметрами технического состояния ЭМК и СТО и согласно которому проводится расчёт, построение и анализ графиков кривых периодичностей ТО в функции длительности проведения ТО. Пример варианта такого графика приведен на рисунке 1.

Предлагается для оценки качества СТО использовать характеризующую различные ее свойства совокупность показателей в виде времени перевода, уровня готовности и затрат на эксплуатацию. Время перевода характеризует динамические свойства СТО и представляет собой время, необходимое для перевода ЭМК из любого неработоспособного в работоспособное состояние с требуемым уровнем готовности. Тогда лучшей будет такая СТО, которая обеспечивает наименьшее время перевода при прочих равных заданных условиях или. ограничениях. В работе рассматриваются: в состоянии ТО три варианта обслуживания (согласно

инструкции по эксплуатации, по скользящему графику и по усеченным объемам с оптимальными периодичностями их проведения) или ТО вообще не проводится, в состоянии текущего ремонта три варианта ТР (путем замены отказавшего или функционального элемента, или субблока, или блока на исправный из ЗИП).

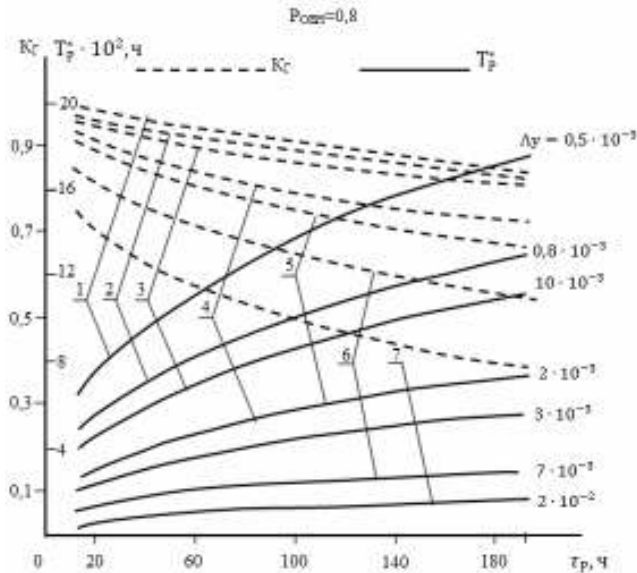


Рисунок 1- Графики коэффициента готовности  $K_g$  и периодичностей  $T_p^*$  в функции длительности ТО

Использование конечного множества вариантов ТО и ТР позволяет ввести понятие стратегии ТО и ТР, представляющей собой совокупность указаний о порядке обслуживания и ремонта аппаратуры в любом из ее состояний. Содержание отдельной стратегии определяется конкретным набором вариантов по всем состояниям ЭМК, задаваемых в виде его ГСП. Одна от другой стратегии отличаются хотя бы одним вариантом в любом из состояний ЭМК.

В работе предлагается объединение ранжированных по важности показателей в задаче математического программирования, где в качестве целевой функции выбрано время перевода, являющееся функцией параметров СТО и технического состояния ЭМК, а остальные показатели (уровень готовности, затраты на эксплуатацию комплекса и другие) учитываются в виде ограничений.

Тогда задачу оценки качества СТО ЭМК, можно сформулировать в следующем виде. Найти набор параметров  $T_p^* m_{ij}$  назначения  $j$ -й стратегии для обслуживания  $i$ -го ЭМК на рассматриваемом шаге эксплуатации  $y \cdot (y = \overline{1, y_k})$ , при котором обеспечивается перевод системы из неработоспособного в работоспособное состояние с наименьшим суммарным временем перевода  $t_{nij}$  и обеспечивается функционирование  $i$ -го ЭМК с учетом технико-экономической важности  $\omega_i$  каждого из них, то есть найти минимум функции:

$$M_y = \sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^J t_{nij}(y) \cdot m_{ij}, y = \overline{1, y_k}, \quad (1)$$

где  $t_{nij}(y) = \sum_{k=1}^{BN} \sum_{l=1}^N t_{kij}(y)$ ,

$$K_{tr}(t_{nij}, y) \cdot m_{ij} \geq K_{ri}(y), i = \overline{1, B}, j = \overline{1, J}; \quad (2)$$

$$0 \leq \omega_i(y) \leq 1; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^B \sum_{j=1}^J C_{ij}(y) \cdot \omega_i(y) \cdot m_{ij} \leq C_{доп}(y); \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J m_{ij} = 1, i = \overline{1, B}; \sum_{i=1}^B m_{ij} \leq B, j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

где  $m_{ij} = 1$  если  $j$ -я частная стратегия выбрана для обслуживания  $i$ -го ЭМК на интервале эксплуатации  $y$ ,  $m_{ij} = 0$  – в противном случае;  $\hat{E}_{\text{дв}}(y)$  и  $C_{\text{аи}}(y)$  – соответственно требуемое значение уровня готовности и допустимое значение затрат на эксплуатацию ЭМК;  $\omega_i(y)$  – коэффициент технико-экономической важности  $i$ -го ЭМК.

Решение задачи (1) – (5) минимизирует время перевода ЭМК из неработоспособного состояния в работоспособное. При необходимости минимизации эксплуатационных затрат в качестве целевой функции используют затраты на эксплуатацию (4), а время перевода (1) учитывается в виде ограничения.

Оценку входящих в задачу параметров можно осуществить с помощью полумарковской модели процесса эксплуатации ЭМК, представленного в виде ГСП (рис. 2). Процесс эксплуатации ЭМК определяется матрицами условных вероятностей переходов  $\underline{P} = \|\|P_{k1}\|$  вложенной непре-

рывной марковской цепи и условных функций  $\underline{F} = \{F_{kl}(t)\}$  распределения времени пребывания ЭМК в состоянии  $S_k$  до перехода в  $S_l$  ( $k, l = \overline{1, N}$ ).

На практике элементы матрицы  $\underline{P}$  определяются соотношением:

$$P_{kl} = \frac{\tau_{kl}}{\sum_{l=1}^N \tau_{kl}} \quad (6)$$

и

$$\tau_{kl} = \int_0^{\infty} [1 - F_{kl}(t)] \cdot dt. \quad (7)$$

где  $\tau_{kl}$  - среднее время пребывания ЭМК в состоянии  $S_k$  до перехода в  $S_l$ .

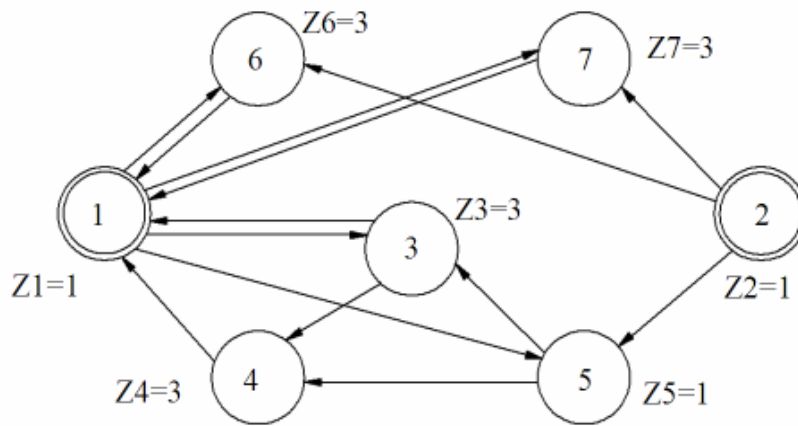


Рисунок 2 – Граф состояний и переходов ЭМК

На основании этих параметров определяются характеристики технического состояния ЭМК, к которым, в частности, относятся:

$$T_k = \sum_{i=1}^N P_{ki} \cdot \tau_{ki}; \quad (8)$$

и

$$K_a = \frac{\sum_{k=1}^R T_k}{\sum_{k=1}^N T_k}, \quad (9)$$

$$C_{2kl} = C_{1kl} \cdot \tau_{kl}, \quad (10)$$

и

$$C_{3k} = \sum_{i=1}^R p_{ki} \cdot C_{2ki}, \quad (11)$$

где  $T_{\kappa}$  – среднее время пребывания ЭМК в любом из  $S_{\kappa}$  состояний ГСП;  $K_{\kappa}$  – коэффициент готовности ЭМК к применению по назначению;  $R$  – число работоспособных состояний ЭМК по ГСП;  $C_{1kl}$  – элемент матрицы удельных затрат и средние затраты на эксплуатацию по каждому переходу ГСП;  $C_{3k}$  – средние затраты, связанные с пребыванием ЭМК в любом из состояний.

Результатом решения сформулированной задачи линейного программирования на каждом шаге эксплуатации, где интенсивность отказов не изменяется, является набор вариантов ТО и ТР, составляющих содержание оптимальной стратегии ТО и ремонта. В такой постановке задача выбора оптимальных стратегий ТО [2,3] относится к классу задач линейного целочисленного программирования. Составлена схема алгоритма выбора оптимальных стратегий ТО и ТР, основанная на использовании метода наименьшего элемента строки матрицы.

**Выводы.** Получено аналитическое соотношение, позволяющее рассчитать оптимальные из условия обеспечения максимума коэффициента готовности периодичности ТО, что дает возможность управлять нестационарным процессом эксплуатации ЭМК. Предложенная в работе схема алгоритма выбора оптимальных стратегий ТО позволит: оценить качество системы обслуживания по данным оптимальной стратегии; обеспечивать заданный уровень готовности ЭМК к применению; создать адаптивную АСУ техническим состоянием ЭМК.

#### ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытаний на безотказность. Пер. с англ. Н.А. Ушакова. –М.: Наука, 1984. –327с.
2. Кажан В.Е., Котлярова И.В. Модель оценки качества системы технического обслуживания электромеханических комплексов. Збірник наукових праць «Транспорт», вип.7. – Дніпропетровськ, ДДТУЗТ, 2001. С.48 – 50.
3. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. К.: Наук. думка, 1976. –184с.

4. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. 5-е изд. –М.: Наука, 1984. –831с.

#### REFERENCES

1. Barlow R., Proshan F. Statistical theory of reliability and reliability tests. Per. from English ON. Ushakov. - М.: Science, 1984. – 27 p.
2. Kazhan V.E., Kotlyarova I.V. Model for assessing the quality of the maintenance system of electromechanical complexes. Zbirnik naukovih Prats "Transport", VIP.7. - Dnipropetrovsk, ДДТУЗТ, 2001. - 130 p.
3. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Semi-Markov processes and their applications. Kiev: Naukova Dumka, 1976. – 184 p.
4. Fadeev D.K., Fadeeva V.N. Computational methods of linear algebra. 2nd ed., M.-L.: Fizmatgiz, 1963. – 734 p.

Received 04.02.2020.

Accepted 06.02.2020.

#### ***Аналітична напівмарковська модель оцінки якості системи технічного обслуговування та стану електромеханічних комплексів***

*Аналіз основних досліджень. На практиці показники надійності ЕМК, зокрема інтенсивність відмов, є змінними в часі величинами. В силу цього необхідно визначати такі значення періодичностей і обсяги ТО, які забезпечували б ЕМК максимальний коефіцієнт готовності. Найбільш адекватна математична модель аналізу технічного стану ЕМК може бути отримана за допомогою апарату теорії напівмарковських процесів (ПМП), основу якої складає орієнтований граф основних станів і переходів (ГСП) ЕМК в ході експлуатації, що дозволяє формувати стратегії обслуговування і поточного ремонту, зміст окремої стратегії визначається конкретним набором варіантів по всіх станах ЕМК.*

*Мета статті. Побудова і дослідження математичної моделі процесу експлуатації ЕМК для визначення оптимальних періодичностей і стратегій технічного обслуговування і ремонту.*

*Основний матеріал дослідження. Вирішення першого завдання включає: побудова моделі процесу експлуатації ЕМК; отримання розрахункового співвідношення для коефіцієнта готовності як функції параметрів технічного стану ЕМК і СТО; отримання аналітичної формули для розрахунку оптимальних періодичностей ТО.*

*У роботі пропонується об'єднання ранжированих за важливістю показників у задачі лінійного програмування, де в якості цільової функції вибрано час переведу, що є функцією параметрів СТО та технічного стані ЕМК, а інші показники (рівень готовності, витрати на експлуатацію комплексу та інші) враховуються у вигляді обмежень. Результатом вирішення цього завдання є набір варіантів ТО і ТР на кожному кроці експлуатації ЕМК, що складають зміст оптимальної стратегії ТО і ремонту.*



*Висновки. Отримано на основі напівмарковської моделі процесу експлуатації ЕМК аналітичне співвідношення, яке дозволяє розрахувати оптимальні із умови забезпечення максимуму коефіцієнта готовності періодичності ТО, що дає можливість керувати нестационарним процесом експлуатації ЕМК, отримувати необхідні техніко-економічні показники якості і будувати адаптивну АСУ технічним станом ЕМК.*

***Semi-Markov analytical model for assessing the quality of the maintenance system and the state of electromechanical complexes***

*Analysis of basic research. In practice, the EMC reliability indicators, in particular the failure rate, are time-varying quantities. In view of this, it is necessary to determine such periodicity values and maintenance volumes that would ensure the EMC maximum availability factor. The most adequate mathematical model for analyzing the technical state of EMC can be obtained using the apparatus of the theory of semi-Markov processes (PMF), the basis of which is an oriented graph of the basic states and transitions (GSP) of EMC during operation, which allows to formulate maintenance and maintenance strategies, the content of a separate strategy is determined a specific set of options for all states of EMC.*

*The purpose of the article. Construction and study of a mathematical model of the EMC operation process to determine the optimal intervals and maintenance and repair strategies.*

*The main research material. The solution to the first problem includes: building a model for the operation of the EMC; the derivation of the calculated ratio for the availability factor as a function of the technical condition of the EMC and the service station; obtaining an analytical formula for calculating optimal maintenance intervals.*

*The paper proposes a combination of indicators ranked by importance in the linear programming problem, where the transfer time, which is a function of the SRT parameters and the technical condition of the EMC, is selected as the objective function, and the remaining indicators (readiness level, complex operation costs, and others) are taken into account in the form of restrictions. The result of solving this problem is a set of maintenance and repair options at each step of the operation of the EMC, which comprise the content of the optimal maintenance and repair strategy.*

*Conclusions. An analytical relationship was obtained on the basis of the semi-Markov model of the operation process that allows one to calculate the optimal conditions for ensuring the availability factor of the periodicity of maintenance, which makes it possible to control the unsteady operation of the EMC, to obtain the necessary technical and economic quality indicators to build an adaptive ACS with the technical state of the EMC.*

**Кажан Владимир Евстафьевич** – к. т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электропривода Национальной металлургической академии Украины.

**Степкин Василий Владимирович** – к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электропривода Национальной металлургической академии Украины.

**Котлярова Ксения Алексеевна** - студентка отделения экономики, финансов и управления фирмами Ягеллонского университета, Краков, Польша.

**Юдин Александр Вячеславович** - студент группы АПО1-15 кафедры электротехники и электропривода Национальной металлургической академии Украины.

**Кажан Володимир Євстафійович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України.

**Стьопкін Василь Володимирович** – к. т.н., доцент, доцент кафедри електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України.

**Котлярова Ксенія Олексіївна** - студентка відділення економіки, фінансів та управління фірмами Ягеллонського університету, Краків, Польща.

**Юдін Олександр В'ячеславович** - студент групи АП01-15 кафедри електротехніки та електропривода Національної металургійної академії України.

**Kazhan Volodymyr** - Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electric Drive, National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Stopkin Vasyl** - Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electric Drive, National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Kotlyarova Ksenia** - student of the Jagiellonian University's Department of Economics, Finance and Management, Krakov, Poland.

**Yudin Alexander** - student of the group AP01-15 of the Department of Electrical Engineering and Electric Drive of the National Metallurgical Academy of Ukraine.